

TP Convertisseur photovoltaïque

Objectifs de ce travail :

- analyser les caractéristiques d'un module photovoltaïque.
- comprendre comment l'irradiation, la température, les ombres modifient ces caractéristiques.
- comprendre l'intérêt d'intercaler un convertisseur DC/DC entre le générateur photovoltaïque et la charge continue.
- utiliser les relations de dimensionnement d'un hacheur pour retrouver les paramètres des composants passifs (capacité, inductance).
- analyser des commandes extrémales (recherche du maximum de puissance).

1. ETUDE DU PANNEAU SOLAIRE

1.1 Caractéristique théorique d'un panneau solaire.

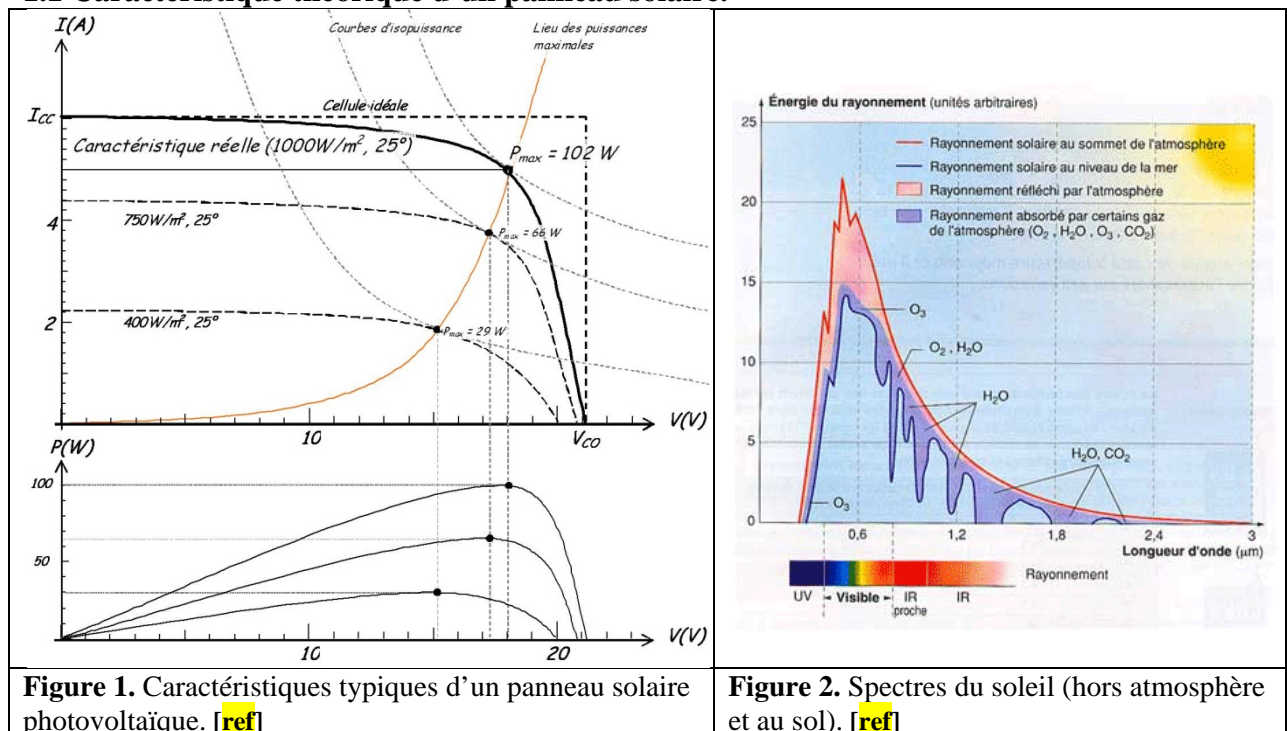


Figure 1. Caractéristiques typiques d'un panneau solaire photovoltaïque. [ref]

Figure 2. Spectres du soleil (hors atmosphère et au sol). [ref]

La partie supérieure de la figure 1 donne la forme des caractéristiques $I(V)$ d'un panneau solaire pour différents ensoleillements (exprimés en W/m^2). La partie inférieure présente les caractéristiques $P(V)$ correspondantes. Un panneau se comporte comme un générateur de tension près de la tension de circuit-ouvert et comme un générateur de courant près du courant de court-circuit.

Le spectre du soleil est donné figure 2.

a/ Notations :

Courant de court-circuit : I_{SC} (A),

Tension de circuit ouvert : V_{OC} (V)

Ensoleillement (ou irradiation): G (W/m^2) Une irradiation de $1000 W/m^2$ est obtenue à Toulouse vers midi au mois de juin, il est rare d'avoir plus (cf figure 6).

AM : Air Masse (précise les conditions spectrales d'ensoleillement). Le spectre du soleil (cf figure 2) à la surface de la Terre dans les conditions standard est noté AM 1,5. AM 0 correspond au spectre du soleil hors atmosphère et AM 1 au spectre du soleil au zénith. Si on note ϕ , l'angle d'élévation du soleil (azimut), on a approximativement :

$$AM = \frac{1}{\sin(\varphi)} \quad \text{Eq. 1}$$

Soit $\varphi = 42^\circ$ pour $AM = 1,5$

Température : T ($^\circ\text{C}$)

STC: Standard Test Conditions : (1000 W/m^2 , $AM1,5$, 25°C). La fiche technique d'un panneau donne ces performances dans les STC.

Puissance max : P_{MAX} (W)

Puissance crête : P_C (P_P). (W_C -Watt crête- ou W_P -Watt peak-) P_{MAX} récupérée dans les STC.

Facteur de forme : FF
$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad \text{Eq. 2}$$

b/ Influence de l'irradiation :

Comme on peut le constater sur la figure 3, le courant de court-circuit est proportionnel à l'irradiation et en première approximation, la puissance maximale aussi.

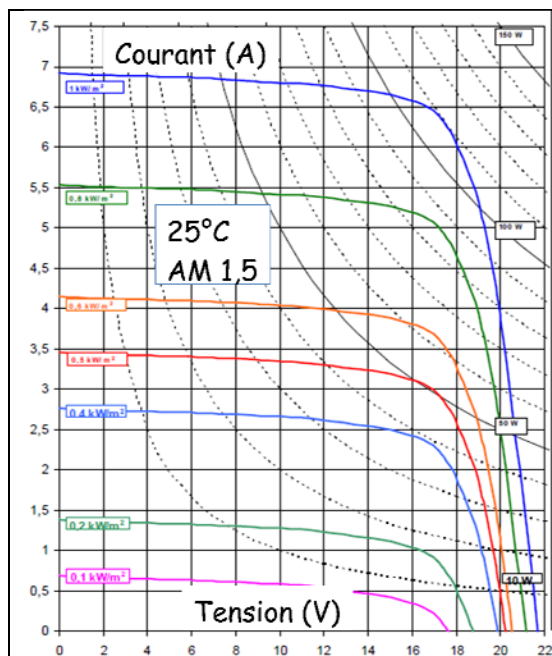


Figure 3. Caractéristiques I(V) du panneau Photowatt PW6 pour différentes irradiations.

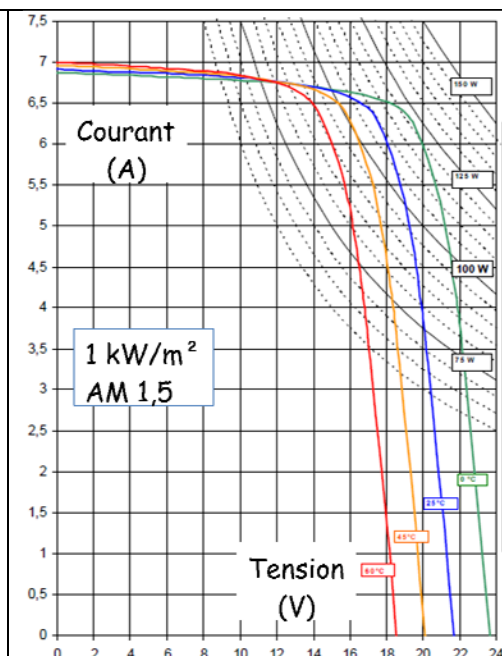


Figure 4. Caractéristiques I(V) du panneau Photowatt PW6 pour différentes températures.

Le soleil est aussi une grandeur variable sur la journée comme le montre la figure 5.

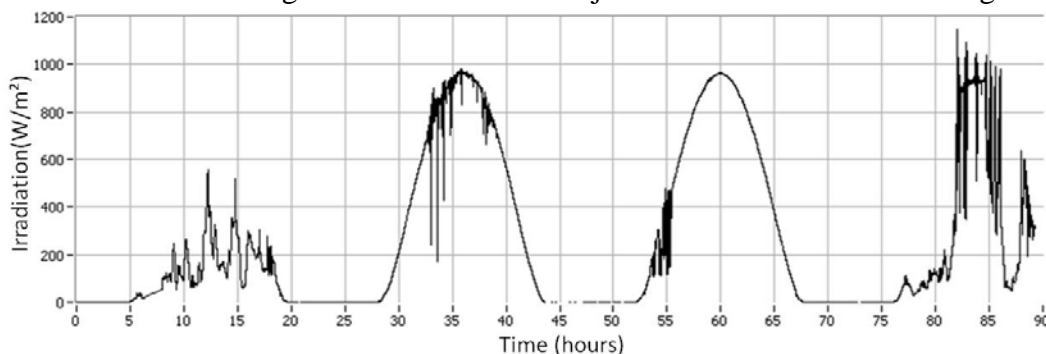


Figure 5. Relevé de l'irradiation à Toulouse entre le 11 juin 0h et le 14 juin 17h -données fournies aimablement par le Laboratoire d'Aérodologie de Toulouse-.

c/ Influence de la température :

La figure 4 montre l'influence de la température.

Quantitativement, dans le cas des panneaux utilisés (Tab 1), le courant augmente d'environ 2,085 mA / °C et la tension décroît de 79 mV / °C. La baisse globale de puissance est d'environ de 0,43 % / °C. Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante.

Les panneaux disposés sur le toit sont des Photowatt PW6-110 avec 90 W_C. Le tableau ci-dessous donne leurs spécifications techniques :

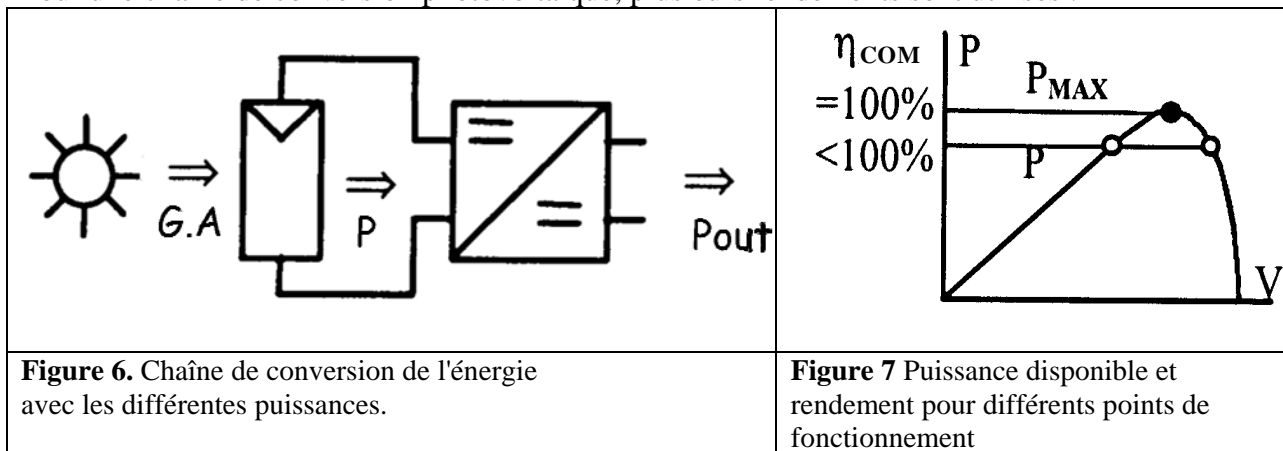
CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES				
PW6-110		Configuration 12 V		
Puissance typique	W	90	100	110
Puissance minimale	W	85	95,1	105,1
Tension à la puissance typique	V	16,4	16,7	17,2
Intensité à la puissance typique	A	5,5	6,0	6,4
Intensité de court circuit	A	6,1	6,5	6,9
Tension en circuit ouvert	V	21,1	21,5	21,7
Tension maximum du circuit	V	1000V DC		
Coefficients de température		$\alpha = +2,085 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$; $\beta = -79 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$; $\gamma \text{ P/P} = -0,43 \text{ \% }/^{\circ}\text{C}$		
Spécifications de puissance à 1000 W/m ² ; 25°C : AM 1,5				

Tableau 1 Extrait de la notice technique du panneau Photowatt PW6.

Question : Un jour de beau temps ($G=1000 \text{ W/m}^2$), la température est de 60°C sur le panneau, quelle sera la production max, quelles est la perte par rapport aux STC en % ?

d/ Rendements :

Pour une chaîne de conversion photovoltaïque, plusieurs rendements sont utilisés :



L'irradiance G (W/m²) mesure la puissance lumineuse reçue par unité de surface. La puissance reçue par le panneau de surface A (m²) est donc $G.A$ (cf figure 6). Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté η_{PV} est défini par :

$$\eta_{PV} = \frac{P_{MAX}}{G \cdot A} \quad \text{Eq. 3}$$

où P_{MAX} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau. P_{MAX} dépend des paramètres physiques du panneau et des conditions météorologiques. La puissance P effectivement délivrée par le panneau va dépendre en plus de la commande utilisée dans le convertisseur -MPPT, asservissement de tension, pas de commande (régulateur shunt)...-. Le rendement qui en découle noté η_{COM} permet de mesurer l'efficacité de la commande associé au convertisseur (cf figure 7).

$$\eta_{COM} = \frac{P}{P_{MAX}} \quad \text{Eq. 4}$$

Le rendement du convertisseur noté η_{CONV} est généralement fourni par les documents constructeurs. Il est défini, en notant P_{OUT} la puissance délivrée en sortie du convertisseur, par :

$$\eta_{CONV} = \frac{P_{OUT}}{P} \quad \text{Eq. 5}$$

Le rendement total de la chaîne de conversion η_{TOTAL} est en fait le produit de ces trois rendements précédemment définis, soit :

$$\eta_{TOTAL} = \frac{P_{MAX}[W]}{G[W/m^2] \cdot A[m^2]} \cdot \frac{P[W]}{P_{MAX}[W]} \cdot \frac{Out[W]}{P[W]} \quad \text{Eq. 6}$$

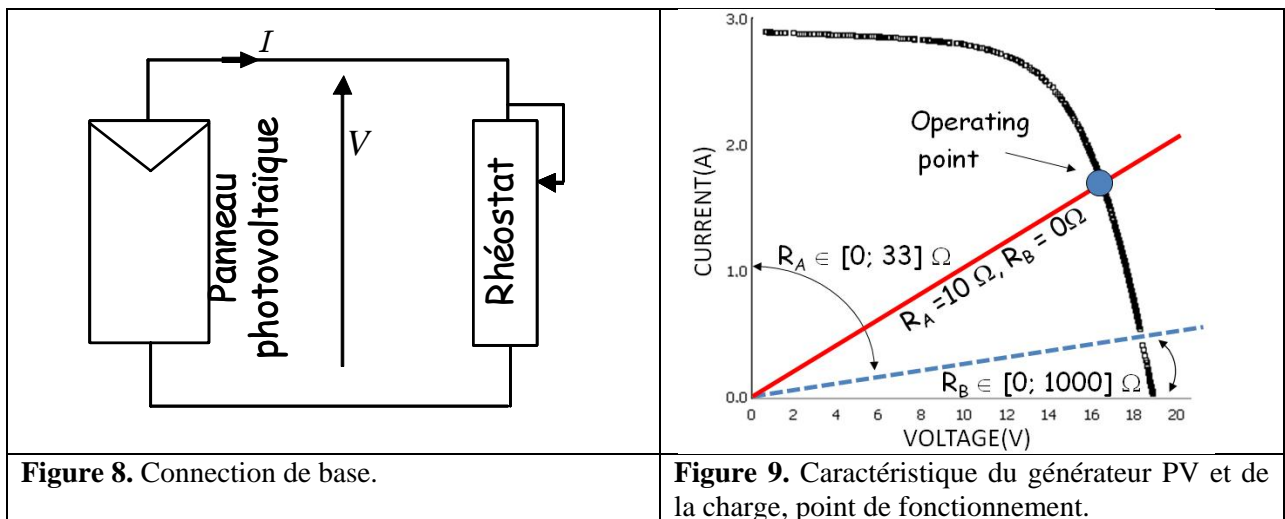
1.2 Tracé des caractéristiques I (V) et P (V)

a/ Avec un traceur.

Branchez en suivant la notice, connectez, récupérez les valeurs sur le PC, puis même questions que dans la partie b.

b/ Avec un rhéostat.

Quelle que soit la méthode utilisée, il est important d'effectuer les relevés à ensoleillement constant. La méthode la plus simple pour tracer une caractéristique I(V) d'un panneau PV est encore de connecter directement à ses bornes une résistance variable (cf. figure 8).



Lorsque la résistance est faible, le rhéostat doit supporter le courant de court-circuit du panneau. Pour l'autre côté de la caractéristique I(V), une valeur de résistance suffisamment grande est nécessaire pour se rapprocher du circuit ouvert. Pour satisfaire ces deux contraintes, il est parfois nécessaire de placer deux rhéostats en série :

- Un rhéostat (A) de 30 Ω capable de supporter le courant de court-circuit du panneau, il permet de balayer la partie gauche de I(V) (faibles valeurs de tension) (cf. figure 9).
- Un second rhéostat (B) de 1000 Ω permettant d'atteindre pratiquement la tension de circuit ouvert (pas ou peu de contrainte sur le courant).

Méthodologie : au démarrage, les deux rhéostats ont leur valeur maximale (l'ouverture du circuit permet même d'avoir la tension de circuit ouvert), on courtcircuite progressivement le rhéostat B de forte valeur (la tension diminue, on surveille le courant pour avoir des points à intervalles réguliers). Une fois B complètement court-circuité, on courtcircuite alors progressivement le rhéostat A de faible valeur.

Si le ciel est sans nuage, cette méthode peut s'utiliser très simplement avec des appareils portatifs (ampèremètre, voltmètre). En revanche si le ciel est nuageux, l'irradiation change parfois en quelques secondes et sur de grandes amplitudes même si l'on ne le ressent pas "à l'œil"! Il faut alors réaliser les mesures rapidement (2 secondes pour un aller/retour des rhéostats).

Dans ce TP, on utilisera simultanément deux oscilloscopes DSO5012A. Le premier permettra d'afficher $I(V)$, le second $P(V)$. La tension V sera prélevée en utilisant un pont diviseur de tension pour diminuer la tension mesurée d'un facteur 2. Pour la mesure de I , une sonde à effet hall (LEM100A) est très pratique (100mV/A, 10 A max) -on enroulera plusieurs fois (10 au max) le fil autour du noyau de mesure de la sonde si le courant à mesurer est trop faible, le gain sera alors pour 10 tours de $1V / A$.

Un multiplieur analogique permet de reconstituer l'image de la puissance. Si X et Y sont les entrées du multiplieur, la sortie vaut $X \times Y / 10$. X et $Y \in [-10 ; +10] V$.

On branchera aussi en permanence un voltmètre et un ampèremètre digitaux pour visualiser la tension et le courant du panneau (V et I).

| *Faire un schéma du câblage à réaliser.*

On visualisera aussi une mesure de l'irradiation issue d'un pyranomètre (SPLite) situé dans le plan des panneaux utilisés. On effectuera aussi une mesure de la température extérieure.

Le pyranomètre et son électronique donne une tension en volts V à multiplier par 111 pour obtenir l'irradiation en W/m^2 .

Matériels : (panneau, rhéostat de 30Ω , rhéostat de 1000Ω , 2 Multimètres, sonde courant, diviseur de tension (1/2), alim $\pm 15V$, multiplieur analogique, 2 Oscillos DSO5012A

Exploitation des mesures :

Questions : Sur les courbes relevées, indiquez les grandeurs suivantes : V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , $V_{@P_{MAX}}$, $I_{@P_{MAX}}$ et donnez leurs valeurs puis calculer FF .

Relier ces valeurs aux valeurs fournies par la documentation. Les résultats sont-ils cohérents ?

A partir des mesures précédentes et de la mesure de G , calculer η_{PV} .

Choisir et mesurer la valeur de résistance notée R_{OPT} pour faire travailler le panneau au point de puissance maximale.

Il y a 35 mètres pour aller au panneau, le fil est du $6mm^2$. Quelle est la chute de tension induite dans les fils, quelle est la perte de puissance correspondante, que devient η_{PV} en tenant compte de cette perte ohmique ?

2. ETUDE DU HACHEUR

2.1 Le convertisseur DC/DC comme adaptateur d'impédance

Une connexion directe panneau / batterie est possible (figure 10), une simple diode en série empêchant le panneau de fonctionner en récepteur d'énergie électrique, mais avec un inconvénient notable : le panneau ne travaille à sa puissance maximale (notée P_{opt}) que si $E = V_{opt}$ ($V_D=0$).

Si $E < V_{opt}$ ou si $E > V_{opt}$, le panneau ne travaille plus au maximum de la puissance.

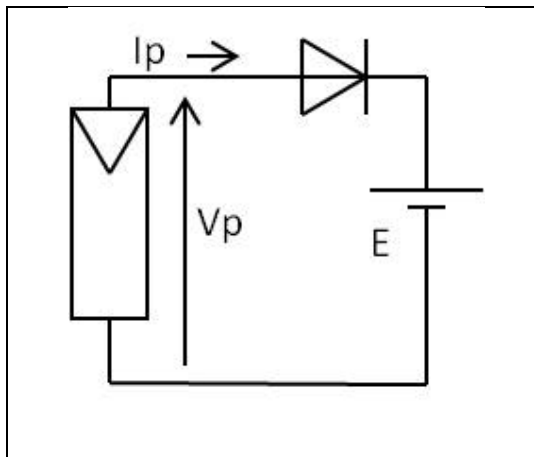


Figure 10. Structure élémentaire.

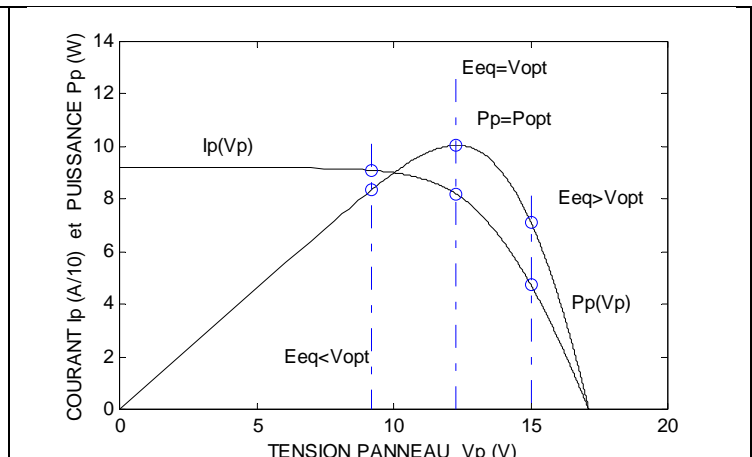


Figure 11. Points de fonctionnement pour différentes valeurs de la tension de batterie .

Un convertisseur statique abaisseur (hacheur série de rapport cyclique α) est intercalé entre la charge et le générateur (figure 12).

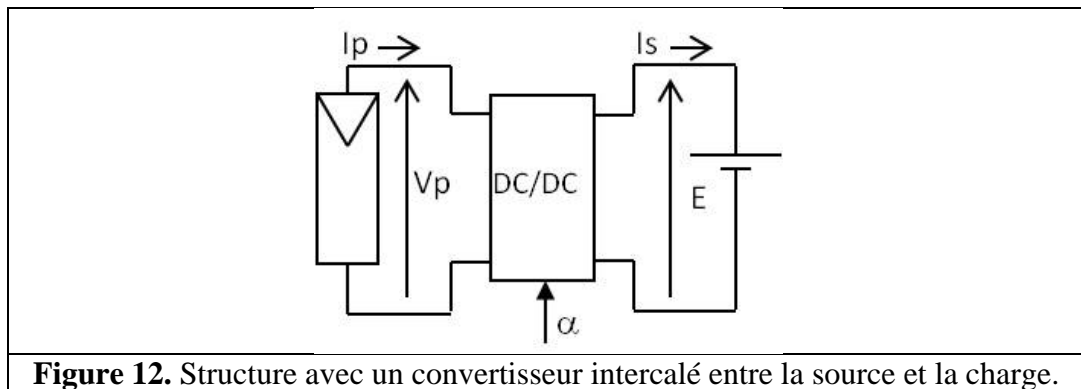


Figure 12. Structure avec un convertisseur intercalé entre la source et la charge.

On a alors les relations suivantes, exprimées en valeurs moyennes:

$$E = \alpha V_p \quad \text{Eq. 7}$$

soit

$$V_p = E / \alpha \quad \text{Eq. 8}$$

La batterie apparaît donc "vue du générateur photovoltaïque" comme un générateur équivalent de tension $E_{eq} = E / \alpha$. En réglant α à la valeur α_{opt} donnée par $\alpha_{opt} = E / V_{opt}$, il est donc possible de placer le dispositif au point de puissance maximum P_{opt} et donc d'accélérer la recharge de la batterie en forçant le panneau à travailler en permanence à son optimum de puissance.

Pour la suite, on utilise un hacheur série dont la structure simplifiée est donnée sur la figure 13.

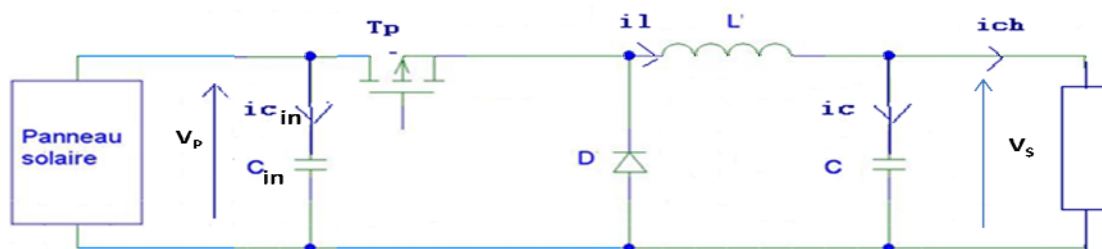


Figure 13. Hacheur série.

Le transistor est commandé par un signal rectangulaire (0-10V) de fréquence fixe (20Khz) et de rapport cyclique α réglable fourni par un GBF.

Régler les caractéristiques du signal fourni par le GBF en le visualisant à l'oscilloscope avant de le connecter à la commande du hacheur.

2-1 Détermination de Δi_{lmax} et ΔV_{smax}

On donne : $L = 0,38 \text{ mH}$ $C = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$

Questions : Pour $V_p = 12\text{V}$ déterminer la valeur de l'ondulation maximum Δi_{lmax} du courant i_l .

Pour $V_p = 12\text{V}$ déterminer la valeur de l'ondulation maximum ΔV_{smax} de la tension V_s .

Les calculs permettant la détermination de Δi_{lmax} et ΔV_{smax} sont fournis en annexe.

Vérification expérimentale :

Réaliser le montage de la figure 13 avec une valeur de $R = 2 \text{ }\Omega$ et un rapport cyclique $\alpha = 0,5$.

Mesurer : V_p , Δi_{lmax} , ΔV_{smax} .

Comparer les mesures effectuées aux calculs théoriques précédents.

2-2 Fonctionnement à P_{max}

Pour un hacheur série, on montre que

$$R_{eq} = \frac{R}{\alpha^2} \quad \text{Eq. 9}$$

Questions : A partir de la caractéristique du panneau relevée précédemment, déterminer la résistance équivalente R_{eq} de charge «vue du panneau» permettant un fonctionnement du panneau à son point de puissance maximum.

Pour une valeur de $R = 2 \text{ }\Omega$, calculer alors la valeur de α correspondante.

On souhaite mesurer les courants et tensions aux niveaux du panneau et de la résistance de charge. Représenter le schéma du montage.

Pour cette même valeur de $R = 2 \text{ }\Omega$, déterminer expérimentalement la valeur de α permettant un fonctionnement du panneau à son point de puissance maximum.

Mesurer la résistance équivalente R_{eq} de charge vue du panneau.

Les résultats sont-ils concordant avec la théorie ? Si non, pourquoi ?

Mesurer le rendement de la structure hacheur pour ce point de fonctionnement ainsi que le rendement global correspondant(panneau + hacheur).

3. CARACTERISATION D'UN CHARGEUR DE BATTERIE INDUSTRIEL

On souhaite montrer dans cette partie les fonctionnalités courantes d'un régulateur de charge solaire. La figure ci-dessous présente la structure classique d'un tel régulateur. Il est interconnecté entre le générateur photovoltaïque, la batterie et la charge.

3.1 Etude préparatoire

En annexe, vous trouverez la fiche technique du solarix de STECA, c'est un régulateur de charge solaire.

A partir de cette doc, retrouvez les fonctionnalités d'un tel chargeur. Pour vous aidez :

- Quels sont les modes de charges : MPPT, tension constante, tension constante, courant constant ?
- Que signifie pour la batterie les charges types floating, bulk ou equalization ?
- Quelles sont les protections indispensables pour la batterie ?

Compte tenu de la batterie disponible 12V, 120Ah ; du convertisseur disponible (Model_PT12-24 Solar converter 12/24, doc en annexe) et des panneaux disponibles, vous choisirez avec l'enseignant les connections à réaliser pour charger la batterie correctement.

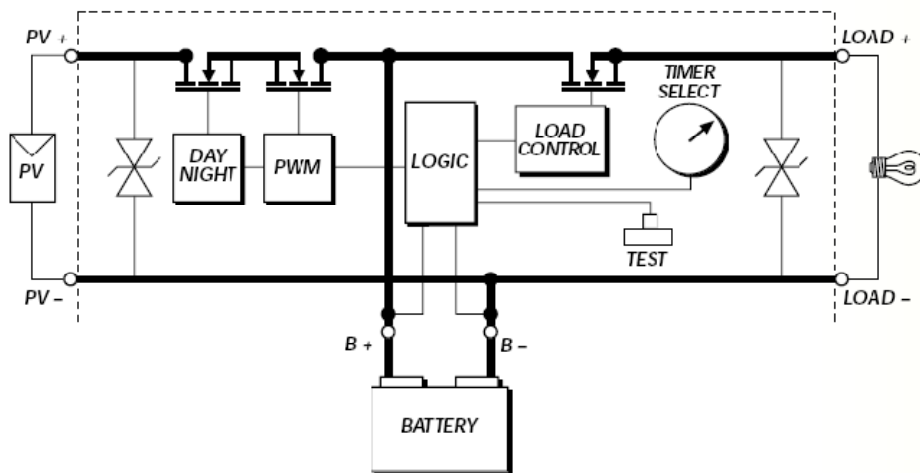


Figure 14. Régulateur de charge solaire source morningstar corp.

Branchement : avec l'enseignant (un seul panneau et batterie de 12V)

Mesures :

Bon fonctionnement ?, Quel type de commande ? rendement ?, consommation à vide ?

4. ETUDE D'UNE STRUCTURE AVEC MPPT

4.1 Principe de la commande MPPT.

La caractéristique $P(V)$ d'un générateur PV présente un extrêmu. Pour maximiser l'énergie récupérée, il est souhaitable de placer le point de fonctionnement sur cet optimum. On parle dans ce cas de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking, suivi du maximum de puissance). Plusieurs algorithmes existent, nous présentons ici l'algorithme P&O (Perturb and Observ).

Partant par exemple d'un rapport cyclique donné α_0 , on l'augmente régulièrement à chaque rafraîchissement de la commande (période T_s). Dans un premier temps la puissance croît (le maximum n'est pas encore atteint), se stabilise (le maximum est alors atteint), puis diminue (le maximum vient d'être dépassé). Le système de mesure détecte cette diminution de puissance, ce qui conditionne une inversion du sens de la commande : le rapport cyclique diminue; la puissance va alors augmenter de nouveau, repasser par le maximum, puis diminuer; dès détection de cette diminution de puissance, le sens de variation du rapport cyclique est à nouveau inversé... Finalement, le système se place en oscillation autour du maximum.

Cette oscillation permet au système de pilotage de vérifier que le maximum ne s'est pas déplacé et si cela est le cas de le suivre mais elle entraîne une perte de rendement, le point de fonctionnement moyen étant en dessous du maximum.

On utilise un hacheur intégrant une commande MPPT telle que présentée sur la figure 13. La période de hachage est de 100kHz. (attention, ce n'est pas la période de la commande T_s qui est plus lente) Les paramètres de réglages ont été fixés pour rendre visible facilement l'oscillation.

Questions :

Visualiser V , l'image de P_P et/ou le signal de commande. L'optimum est-il atteint ?

Combien valent la période de rafraîchissement de la commande (T_s) et l'incrément de α , noté $\Delta\alpha$?

Combien de temps le système met-il pour atteindre le point de puissance maximale après un démarrage (on déconnecte V_P et on reconnecte, ce qui entraîne un reset de la commande) ?

Que ce passe-t-il si on modifie brusquement la valeur du rhéostat ?

Commentez.

Comment aurait-il fallu fixer T_s et $\Delta\alpha$?

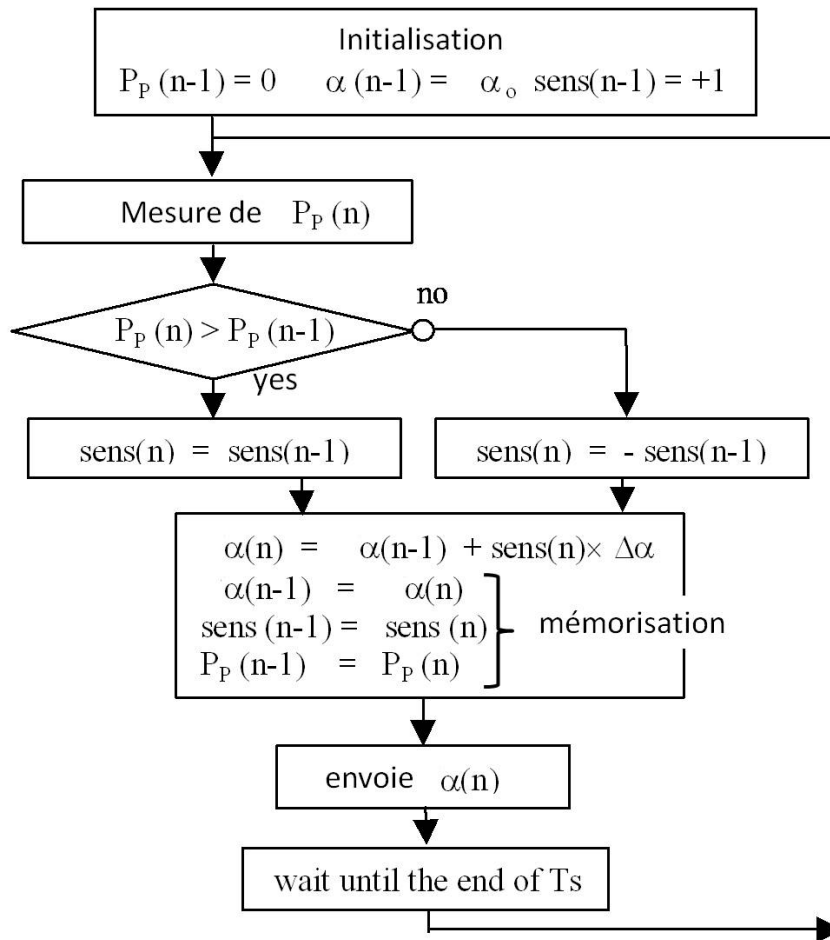
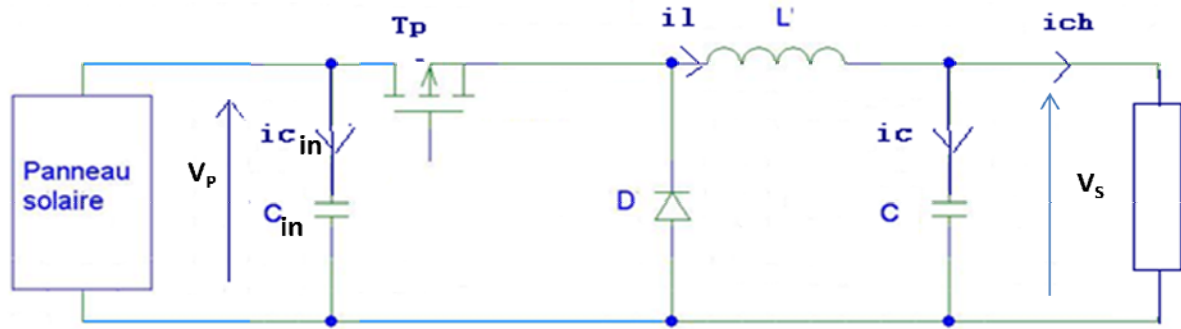


Figure 15 algorithme MPPT

Annexe 1



Le filtre LC sert à limiter l'ondulation maximum $\Delta I_{L\max}$ du courant i_l dans l'inductance et l'ondulation maximum $\Delta V_{S\max}$ de la tension V_s aux bornes de la charge.

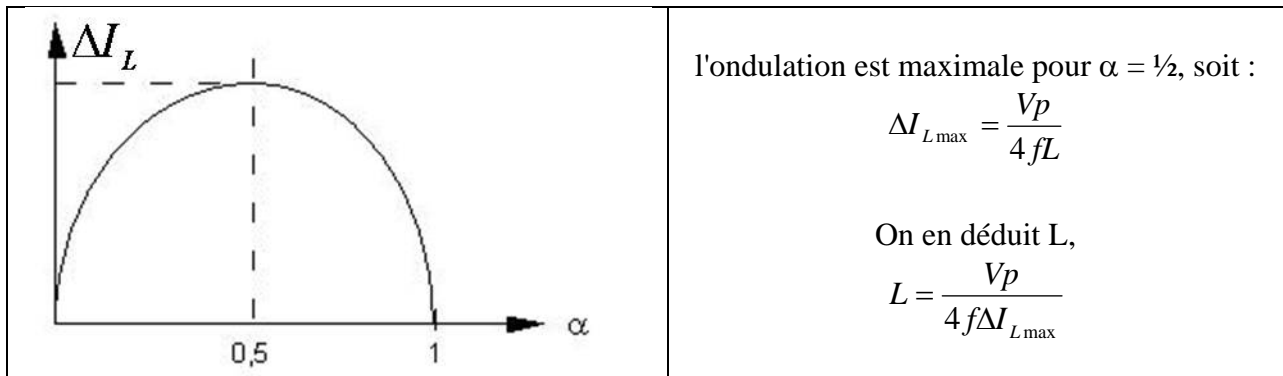
On suppose que la tension à l'entrée du hacheur est constante et égale à V_p .

Sur une période de hachage T ($T = 1/f$ avec $f = 20 \text{ kHz}$), on considère que V_C ne varie pas soit :

$$V_s = \langle V_d \rangle = \alpha V_p,$$

on a alors avec $\Delta I_L = i_{L\max} - i_{L\min}$:

$$\Delta I_L = \frac{V_p T}{L} \alpha (1 - \alpha)$$



Cette ondulation de courant génère une ondulation de tension, on suppose que la composante alternative de courant à la fréquence de hachage est prise en charge complètement par le condensateur C (ce qui est valable si l'ondulation de la tension V_C reste faible). Pour simplifier, les calculs suivants sont effectués dans le cas où l'ondulation est maximale, soit pour $\alpha = 1/2$.

Les allures des courbes i_l , i_c , et V_s sont données sur la page suivante pour $\alpha = 1/2$.

Sur $0 < t < T/4$: on a $i_c(t) = \frac{\Delta I_L / 2}{T / 4} * t$

or $i_c = C \frac{dV_s}{dt}$ on en déduit en intégrant le courant sur le même intervalle:

$$V_s(t) = \frac{2\Delta I_{L\max}}{T C} t^2 / 2 + V_s(0)$$

$$\frac{\Delta V_{S\max}}{2} = \frac{1}{C} \int_0^{T/4} i_c dt$$

or

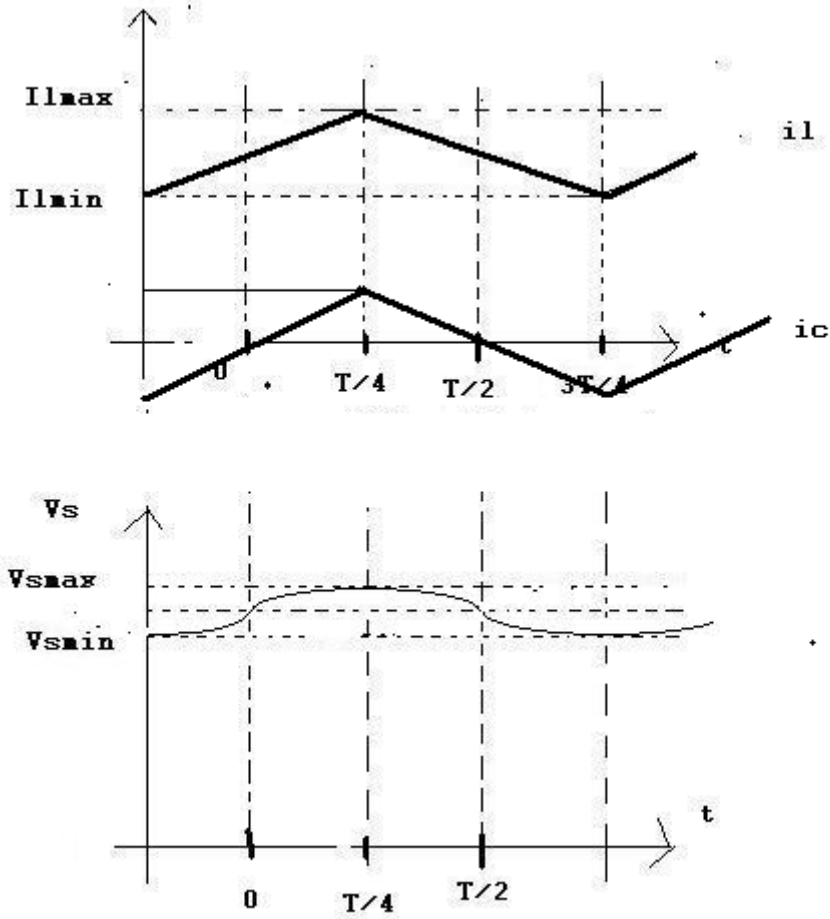
ce qui donne :

$$\Delta V_{s \max} = \frac{\Delta I_{L \max} T}{8C}$$

soit :

$$C = \frac{\Delta I_{L \max}}{8f \Delta V_{C \max}}$$

Cette relation permet le calcul de C en imposant ΔV_s .



Doc du SOLARIX de STECA.

Disponible sur : http://www.stecasolar.com/index.php?Steca_Solarix_MPPT_fr

Steca Solarix MPPT

MPPT 2010

Steca Solarix MPPT 2010 est un régulateur de charge solaire avec la fonction MPP Tracking. Il convient parfaitement à toutes les technologies de panneaux solaires courants et est idéal pour les systèmes solaires avec des tensions de panneaux solaires plus élevées que celle de la batterie. Le Steca Solarix MPPT 2010 est particulièrement adapté pour l'utilisation avec des panneaux solaires normalement prévus pour les installations couplées au réseau. L'algorithme perfectionné de la fonction « MPP Tracking » de Steca permet de disposer constamment de la puissance utile maximale du panneau solaire. Grâce à sa technologie de pointe, le Steca Solarix MPPT 2010 garantit une puissance maximale dans toutes les conditions d'utilisation, une protection professionnelle de la batterie, un design moderne et des fonctions de protection exceptionnelles.

Caractéristiques du produit

- Dispositif de poursuite du point de puissance maximale (tracker MPP)
- Régulation de tension et de courant
- Régulation MLI
- Déconnexion de consommateurs en fonction du courant
- Reconnexion automatique du consommateur
- Compensation de température
- Charge d'entretien mensuelle

Fonctions de protection électroniques

- Protection contre les surcharges
- Protection contre les décharges profondes
- Protection contre une polarité inversée des panneaux solaires, des consommateurs et de la batterie
- Protection contre une polarité inversée par fusible interne
- Fusible électronique automatique
- Protection contre les courts-circuits
- Protection contre les surtensions sur l'entrée du panneau solaire
- Protection contre circuit ouvert sans batterie
- Protection contre courant inverse pendant la nuit
- Protection contre surtempérature et surcharge
- Déconnexion en cas de surtension de la batterie

Affichages

- Afficheur à DEL multifonction
- DEL multicolore
- 5 DEL indiquent les états de service
 - pour le service, l'état de charge, les messages de dysfonctionnement

Options

- Fonction éclairage nocturne d'origine ou Steca PA RC 100 réglable
- Paramétrage des valeurs de fonction via le Steca PA RC 100
- Sonde de température externe

Certificats

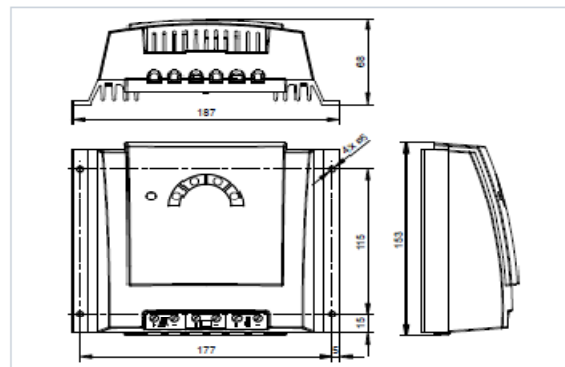
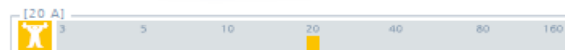
- Conforme aux normes européennes (CE)
- Conforme à la directive RoHS
- Fabriqué en Allemagne
- Développé en Allemagne
- Fabriqué selon les normes ISO 9001 et ISO 14001



Steca PA TS10
Sonde de température
externe



Steca PA RC100
Commande à distance



Solarix MPPT	
Caractérisation des performances de fonctionnement	
Tension de système	12 V (24 V)
Puissance nominale	250 W (500 W)
Efficacité max.	> 98 %
Consommation propre	10 mA
Côté entrée DC	
Tension MPP	15 V (30 V) < V _{panneau} < 100 V
Tension à vide du panneau photovoltaïque (à la température de service minimale)	**17 V ... 100 V (34 V ... 100 V)
Courant du panneau	18 A
Côté sortie DC	
Courant de charge	20 A
Courant du consommateur	10 A
Tension finale de charge*	13,9 V (27,8 V)*
Tension de charge rapide*	14,4 V (28,8 V)*
Charge d'égalisation*	14,7 V (29,4 V)*
Point de référence de réenclenchement (LVR)*	12,5 V (25 V)*
Protection contre la décharge profonde (LVD)*	11,5 V (23 V)*
Conditions de fonctionnement	
Température ambiante	-25 °C ... +40 °C
Installation et construction	
Borne de raccordement (à fils fins / à un fil)	16 mm ² / 25 mm ² - AWG 6 / 4
Degré de protection	IP 32
Dimensions (X x Y x Z)	187 x 153 x 68 mm
Poids	900 g env.

* regardez options

Données techniques à 25 °C / 77 °F

**ATTENTION
Si la tension à vide du panneau photovoltaïque raccordé dépasse 100 V, le régulateur sera détruit.
Lors de la sélection du panneau photovoltaïque, veillez à ce que la tension à vide ne dépasse jamais 100 V sur toute la plage de température. En cas d'utilisation de panneaux photovoltaïques dont la tension à vide max. (sur toute la plage de température) est comprise entre 75 et 100 V, l'ensemble de l'installation doit être réalisée selon la classe de protection II.

